

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт энергетики и транспортных систем
Кафедра «Электротехники и электроэнергетики»

Работа допущена к защите

Заведующий кафедрой

_____ В.Я.Фролов

«___» _____ 2015 г.

ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

Модернизация трансформатора тока 10 кВ

по направлению 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

Выполнил

Н.В.Завьялов

студент гр.43215/2

подпись

Научный руководитель

В.Е. Кузнецов

к. ф-м н.

подпись

Санкт-Петербург

2015г.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Кафедра электротехники и электроэнергетики

УТВЕРЖДАЮ

“ _____ ” _____ 2015 г.

Зав. кафедрой _____ В.Я.Фролов

(подпись)

ЗАДАНИЕ по бакалаврской работе

студенту Завьялов Н.В.

Тема проекта (работы): **Модернизация трансформатора тока 10 кВ**

Срок сдачи студентом законченного проекта (работы): 31.05.2015.

1. Исходные данные к проекту (работе): Номинальное первичное напряжение $U_{1н} = 6$ кВ, $I_{1н} = 600$ А, $f = 50$ Гц, $I_{2н} = 5$ А, номинальная вторичная нагрузка $Z_{2н} = 0,4$ Ом, $\cos \varphi = 0,8$, класс точности 0,5, ТТ имеет два магнитопровода, односекундная термическая стойкость равна 65, электродинамическая кратность 160. ГОСТ 7746-78
2. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов): Назначение, классификация, условия работы и эксплуатации в различных режимах. Надежность ТТ, расчет погрешностей, основных параметров конструкции, термическая и динамическая стойкость, методы испытаний.
3. Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): Общий вид ТТ; Разрез ТТ.
4. Консультанты по проекту (с указанием относящихся к ним разделов проекта, работы): к. ф-м н. Кузнецов В.Е., к.т.н. Тонконогов Е.Н.
5. Дата выдачи задания 09.02.2015 г.

Руководитель Кузнецов В.Е.

Задание принял к исполнению 14.05.2015

(дата)

(подпись студента)

РЕФЕРАТ

На ... страниц, ... рисунков, ... приложений.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ТОКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ, ТИП ТПОЛ 10,
ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК, МОДЕРНИЗАЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА.

В данной работе рассмотрены основные параметры и характеристики трансформаторов тока, условия работы и эксплуатации ТТ.

Произведен анализ и расчет основных конструктивных параметров ВВ измерительного ТТ на 10кВ ТПОЛ-10, определены основные параметры, предъявляемым к ТТ предназначенным для работы в КРУ, рассмотрены зависимости погрешностей ТТ от режимов работы, представлен вариант модернизации учебной лабораторной работы на базе ТТ ТПОЛ-10.

Modernization of the current transformer TPOL – 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.	5
Глава 1. Назначение и основные параметры трансформаторов тока.	7
1.1. Назначение трансформаторов тока.	7
1.2. Классификация трансформаторов тока.	8
1.3. Основные параметры и характеристики трансформаторов тока.	13
1.4. Классы точности и нормы погрешности трансформаторов тока.	20
Глава 2. Требования к трансформатору предназначенному для комплектного распределительного устройства.	22
Глава 3. Условия работы и эксплуатации трансформатора тока в переходном и установившемся режимах работы.	25
Глава 4. Надежность трансформатора тока.	29
Глава 5. расчет трансформатора тока.	31
5.1. Выбор сечения проводников обмоток.	31
5.2. определение числа витков вторичной обмотки.	32
5.3. Ориентировочный выбор сечения магнитопровода.	32
5.4. Определение размеров магнитопровода.	32
5.5. Активное сопротивление вторичной обмотки.	34
5.6. Полное сопротивление вторичной обмотки.	35
5.7. Угол сдвига фаз между E_2 и I_2 .	36
5.8. Расчет погрешности проводим для $I_1 = 0,1I_{1ном}$, $I_1 = 0,2I_{1ном}$, $I_1 = 1,2I_{1ном}$ при $Z_2 = Z_{2ном}$.	36
5.9. Нагрев в длительном режиме.	40
Заключение.	43
Список используемой литературы.	44
Приложение 1.	
Приложение 2.	

ВВЕДЕНИЕ

В энергосистемах и на предприятиях необходим постоянный контроль режимов работы электрооборудования. Такой контроль производится для учёта электроэнергии, для ведения режимов работы электростанций и сетей и для защиты электрооборудования при авариях. С этой целью устанавливаются измерительные трансформаторы тока и напряжения. В процессе данной научно-исследовательской работы мы ознакомимся с измерительным трансформатором тока - аппаратом, предназначенным для преобразования тока до величины удобной для измерений. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в цепь с измеряемым переменным током, а во вторичную включаются измерительные приборы. Ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока, пропорционален току, протекающему в его первичной обмотке.

Трансформаторы тока широко используются для измерения электрического тока и в устройствах релейной защиты электроэнергетических систем, в связи с чем на них накладываются высокие требования по точности. Трансформаторы тока обеспечивают безопасность измерений, изолируя измерительные цепи от первичной цепи с высоким напряжением, часто составляющим сотни киловольт.

К трансформаторам тока предъявляются высокие требования по точности. Как правило, трансформатор тока выполняют с двумя и более группами вторичных обмоток: одна используется для подключения устройств защиты, другая, более точная — для подключения средств учёта и измерения.

Целью настоящей работы является исследование трансформатора тока ТПОЛ-10, а так же расчет характеристик для дальнейшего использования данного трансформатора на лабораторном стенде кафедры «Электротехники и электроэнергетики».

Основной задачей работы является произвести анализ и расчет основных конструктивных параметров ВВ измерительного ТТ на 10кВ ТПОЛ-10, определить основные параметры, предъявляемым к ТТ предназначенным для работы в КРУ, рассмотреть зависимости погрешностей ТТ от режимов работы, предложена возможность создания учебной лабораторной работы на базе ТТ ТПОЛ-10.

ГЛАВА 1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

1.1. Назначение трансформаторов тока

Трансформаторами тока (ТТ) называются измерительные аппараты, служащие для преобразования тока, в которых при нормальных условиях работы вторичный ток практически пропорционален первичному току и при правильном включении сдвинут относительно него по фазе на угол приблизительно равный нулю. Первичная обмотка ТТ включается в цепь последовательно (в рассечку токопровода), а вторичная обмотка замыкается на некую нагрузку (измерительные приборы и реле), обеспечивая прохождение по ней тока, пропорционального току в первичной обмотке.

Высоковольтный измерительный ТТ является основным измерительным устройством в электроэнергетике и отличается от применяемых в высоковольтной технике уровнем изоляции между первичной и вторичной обмотками. В ТТ высокого напряжения первичная обмотка изолирована от вторичной обмотки (от земли) на полное напряжение. Вторичная обмотка в эксплуатации имеет потенциал близкий к потенциалу земли, так как один конец этой обмотки обычно заземлён. С помощью ТТ можно измерять и учитывать ток высокого напряжения приборами низкого напряжения, доступными для непосредственного наблюдения персонала, и свести к измерению любого первичного тока, например 5 А или 1 А.

Трансформаторы тока по своему назначению разделяются на трансформаторы тока для измерений и трансформаторы тока для защиты. В некоторых случаях эти функции совмещаются в одном (ТТ).

По назначению ТТ делятся на:

- Измерительные

1. Преобразование переменного тока любого значения в переменный ток, приемлемый по значению для непосредственного измерения с

помощью стандартных измерительных приборов

2. Изолирование измерительных приборов к которым имеет доступ обслуживающий персонал, от цепи высокого напряжения.

- Защитные

1. Преобразование переменного тока любого значения в переменный ток, приемлемый по значению для питания устройств релейной защиты;
2. Изолирование реле, к которым имеет доступ персонал, от цепи высокого напряжения.

Измерительные ТТ отличаются от силовых ТТ следующими признаками :

1. Измерительный ТТ работает в условиях, близких к короткому замыканию, так как сопротивление во вторичной цепи у него весьма мало. Этот режим является нормальным режимом работы, в то время как для силового ТТ режим работы при коротком замыкании является аварийным;
2. Индукция в измерительном ТТ непостоянна и определяется измеряемым током и режимом эксплуатации трансформатора, в то время как в силовом трансформаторе индукция постоянна.
3. Ток во вторичной цепи измерительного ТТ в известных пределах не зависит от нагрузочного сопротивления и в основном изменяется в соответствии с изменением первичного тока. В силовом ТТ первичный ток изменяется в зависимости от нагрузки вторичной обмотки.

Применение трансформаторов тока в установках высокого напряжения является необходимым даже в тех случаях, когда уменьшения тока для измерительных приборов или реле не требуется.

1.2 Классификация трансформаторов тока.

Все трансформаторы тока - и для измерений, и для защиты – можно классифицировать по следующим основным признакам.

По роду установки:

1. трансформаторы тока для работы на открытом воздухе (категория размещения 1 по ГОСТ 15150-69);
2. для встраивания во внутренние полости электрооборудования (категория в соответствии с табл.);
3. для специальных установок (в шахтах, на судах, электровозах и т. д.).

Таблица 1.2.1.

Категория размещения трансформаторов тока, встраиваемых во внутренние полости оборудования

Таблица 1.1.

СРЕДА	Категория размещения электрооборудования по ГОСТ 15150-69			
	1	2	3	4
Газовая, изолированная от наружного воздуха, или трансформаторное масло.	4	4	4	4
Газовая, не изолированная от наружного воздуха	2	2	3	4

По способу установки:

1. проходные трансформаторы тока, предназначенные для использования в качестве ввода и устанавливаемые в проёмах стен, потолков или в металлических конструкциях;
2. опорные, предназначенные для установки на опорной плоскости;
3. встраиваемые, т.е. предназначенные для установки во внутренние полости электрооборудования.

По числу коэффициентов трансформации:

1. с одним коэффициентом трансформации;
2. с несколькими коэффициентами трансформации, получаемыми изменением числа витков первичной или вторичной обмотки, или обеих обмоток, или применением нескольких вторичных обмоток с различным числом витков, соответствующих различным значениям номинального вторичного тока.

По числу ступеней трансформации:

1. одноступенчатые;
2. каскадные (многоступенчатые), т.е. с несколькими ступенями трансформации тока.

По выполнению первичной обмотки:

1. одновитковые;
2. многовитковые.

Одновитковые ТТ имеют две разновидности:

1. Без собственной первичной обмотки;
2. С собственной первичной обмоткой.

Одновитковые ТТ, не имеющие собственной первичной обмотки, выполняются встроенными, шинными или разъёмными.

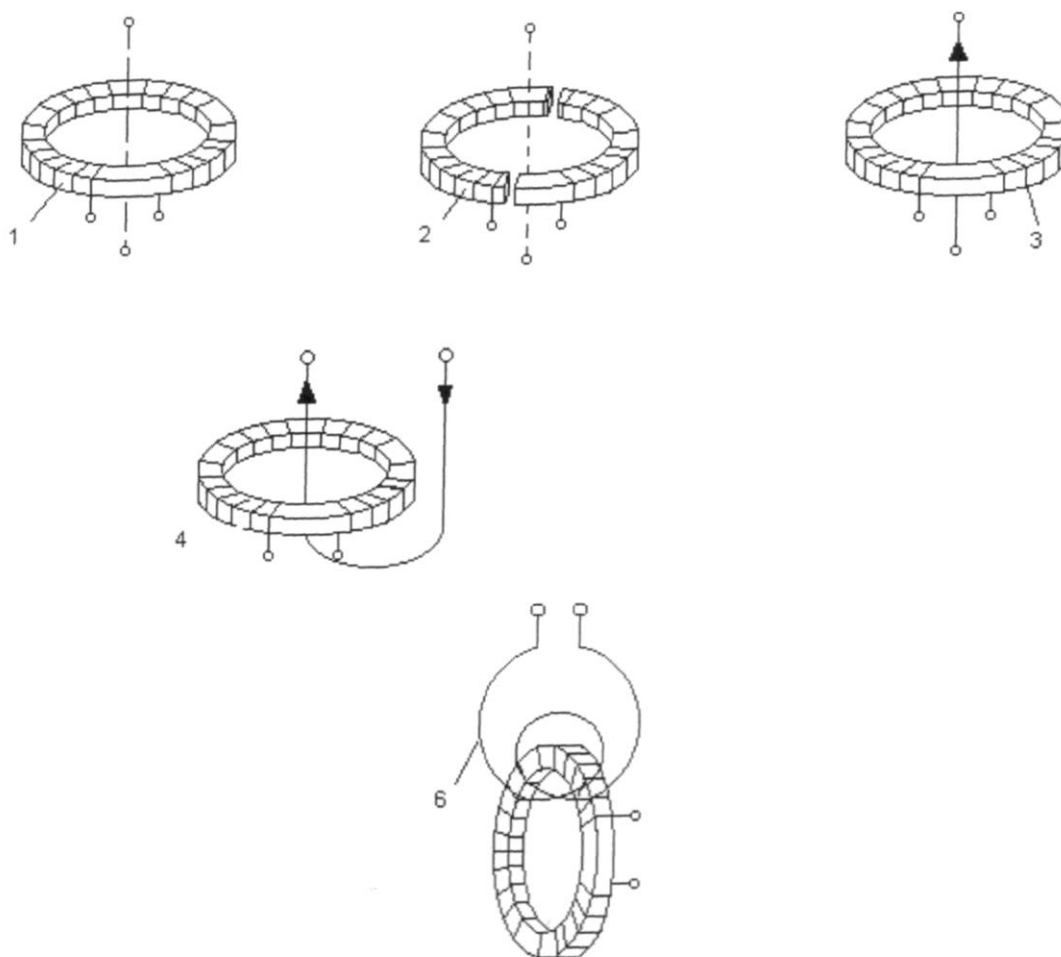


Рис. 1.1. Схема трансформаторов тока.

Встроенный трансформатор тока представляет собой магнитопровод с намотанной на него вторичной обмоткой и не имеет собственной первичной обмотки. Её роль выполняет токоведущий стержень проходного изолятора. Этот трансформатор тока не имеет изоляционных элементов между первичной и вторичной обмотками. Их роль выполняет изоляция проходного изолятора.

В шинном трансформаторе тока 1 роль первичной обмотки выполняют одна или несколько шин распределительного устройства, пропускаемые при монтаже сквозь внутреннюю полость проходного изолятора. Последний изолирует такую первичную обмотку от вторичной.

Разъёмный трансформатор тока 2 тоже не имеет собственной

первичной обмотки. Его магнитопровод состоит из двух частей, стягиваемых болтами. Он может размыкаться и смыкаться вокруг проводника с током, являющимся первичной обмоткой. Изоляция между первичной и вторичной обмотками наложена на магнитопровод со вторичной обмоткой.

Одновитковые ТТ, имеющие собственную первичную обмотку, выполняются со стержневой первичной обмоткой или с U-образной.

Трансформатор тока 3 имеет первичную обмотку в виде стержня круглого или прямоугольного сечения, закреплённого в проходном изоляторе.

Трансформатор тока 4 имеет U-образную первичную обмотку, выполненную таким образом, что на неё наложена почти вся внутренняя изоляция ТТ.

Многовитковые трансформаторы тока

(Рис 1.1.) изготавливаются:

1. с катушечной первичной обмоткой, надеваемой на магнитопровод;
2. с петлевой первичной обмоткой 5, состоящей из нескольких витков;
3. со звеньевой первичной обмоткой 6, выполненной таким образом, что внутренняя изоляция трансформатора тока конструктивно распределена между первичной и вторичной обмотками, а взаимное расположение обмоток напоминает звенья цепи;

внутренняя изоляция трансформатора тока нанесена в основном только на первичную обмотку, имеющую форму рыма.

По роду изоляции между первичной и вторичной обмотками ТТ изготавливаются:

1. с твёрдой (фарфор, литая изоляция, прессованная изоляция и т. д.) изоляцией;
2. с вязкой (заливочные компаунды) изоляцией;
3. с комбинированной (бумажно-масляная, конденсаторного типа) изоляцией;

4. газообразной (воздух, элегаз) изоляцией.

По принципу преобразования тока ТТ делятся на:

1. электромагнитные;
2. оптикоэлектронные.

1.3 Основные параметры и характеристики трансформаторов тока.

Основными параметрами и характеристиками трансформатора тока в соответствии с ГОСТ 7746-78 «Трансформаторы тока. Общие технические требования» являются:

1. Номинальное напряжение - действующее значение линейного напряжения, при котором предназначен работать ТТ, указываемое в паспортной таблице трансформатора тока. Для отечественных ТТ принята следующая шкала номинальных напряжений, кВ:

0,66, 6, 10, 15, 20, 24, 27, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150.

2. Номинальный первичный ток - Указываемый в паспортной таблице ТТ ток, проходящий по первичной обмотке, при котором предусмотрена продолжительная работа трансформатора тока. Для отечественных ТТ принята следующая шкала номинальных первичных токов, А:

1, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75*, 80, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 750*, 800, 1000, 1200*, 1500, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000, 18000, 20000, 25000, 28000, 32000, 35500, 40000. В трансформаторах тока, предназначенных для комплектования турбо- и гидрогенераторов, значения номинального тока свыше 10000 А являются рекомендуемыми. Значения номинального тока, отмеченные звездочкой в приведенной выше шкале, допускаются только в трансформаторах тока с секционированными обмотками для получения нескольких коэффициентов трансформации. Трансформаторы тока, рассчитанные на номинальный первичный ток 15, 30, 75, 150, 300, 600, 750, 1200, 1500, 3000 и 6000 А, должны допускать неограниченно длительное время

прохождения наибольшего рабочего первичного тока, равного соответственно 16, 32, 80, 160, 320, 630, 800, 1250, 1600, 3200 и 6300 А. В остальных случаях наибольший первичный ток равен номинальному первичному току.

3. Номинальный вторичный ток - указываемый в паспортной таблице ТТ ток, проходящий по вторичной обмотке. Номинальный вторичный ток принимается равным 1 или 5 А, причём ток 1 А допускается только для ТТ с номинальным первичным током до 4000 А. По согласованию с заказчиком допускается изготовление трансформатора тока с номинальным вторичным током 2 или 2,5 А.

4. Вторичная нагрузка ТТ соответствует полному сопротивлению его внешней вторичной цепи, выраженному в омах, с указанием коэффициента мощности. Вторичная нагрузка может так же характеризоваться полной мощностью в вольт-амперах, потребляемой ею при данном коэффициенте мощности и номинальном вторичном токе.

Вторичная нагрузка с коэффициентом мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$, при которой гарантируется установленный класс точности ТТ или предельная кратность первичного тока относительно его номинального значения, называется номинальной вторичной нагрузкой ТТ $Z_{2 \text{ н.ном}}$.

Для отечественных трансформаторов тока установлены следующие значения номинальной вторичной нагрузки $S_{2 \text{ н.ном}}$, выраженной в вольт-амперах, при коэффициенте мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$:

2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 75; 100.

Соответствующие значения номинальной вторичной нагрузки $Z_{2 \text{ н.ном}}$ (в омах) определяются выражением:

$$Z_{2 \text{ н.ном}} = S_{2 \text{ н.ном}} / I_{2 \text{ ном}}^2$$

5. Коэффициент трансформации ТТ равен отношению первичного тока ко вторичному току.

В расчётах трансформаторов тока применяются два термина:

действительный коэффициент трансформации n и номинальный коэффициент трансформации n_n . Под действительным коэффициентом трансформации понимается отношение действительного первичного тока к действительному вторичному току. Под номинальным коэффициентом трансформации n_n понимается отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току.

6. Стойкость ТТ к механическим и тепловым воздействиям характеризуется током электродинамической стойкости и током термической стойкости.

Ток электродинамической стойкости I_d равен наибольшей амплитуде тока короткого замыкания за всё время его протекания, которую ТТ выдерживает без повреждений, препятствующих его дальнейшей исправной работе. Ток I_d характеризует способность ТТ противостоять механическим (электродинамическим) воздействиям тока короткого замыкания. Электродинамическая стойкость может характеризоваться так же кратностью K_d представляющей собой отношение тока электродинамической стойкости к амплитуде номинального первичного тока. Требования электродинамической стойкости не распространяются на шинные, встроенные и разъёмные ТТ.

Ток термической стойкости I_{tT} равен наибольшему действующему значению тока короткого замыкания за промежуток t_T , которое ТТ выдерживает в течение этого промежутка времени без нагрева токоведущих частей до температур, превышающих допустимые при токах короткого замыкания (см. ниже), и без повреждений, препятствующих его дальнейшей работе.

Термическая стойкость характеризует способность трансформатора тока противостоять тепловым воздействиям тока короткого замыкания. Для суждения о термической стойкости ТТ необходимо знать не только значения тока, проходящего через трансформатор, но и время его прохождения или, иначе

говоря, знать общее количество выделенного тепла, которое пропорционально произведению квадрата тока t_{tT} и времени его прохождения t_T . Это время, в свою очередь, зависит от параметров сети, в которой установлен ТТ, и изменяется от одной до нескольких секунд.

Термическая стойкость может характеризоваться кратностью K_T тока термической стойкости представляющей собой отношение тока термической стойкости к действующему значению номинального первичного тока.

В соответствии с ГОСТ 7746-78 для отечественных трансформаторов тока установлены следующие токи термической стойкости:

А) односекундный I_{1t} (или его кратность K_{1T} по отношению к номинальному первичному току) для трансформаторов тока на номинальное напряжение 330 кВ и выше;

Б) трехсекундный I_{3t} (или его кратность K_{3T} по отношению к номинальному первичному току) для трансформаторов тока на номинальное напряжение 100; 150 и 220 кВ;

В) Четырёхсекундный I_{4t} (или его кратность K_{4T} по отношению к номинальному первичному току) для трансформаторов тока на номинальное напряжение до 35 кВ включительно.

Время t_T протекания тока термической стойкости может быть меньше указанных значений и должно устанавливаться в технических условиях на конкретный тип ТТ, если K_T не превышает следующих значений:

100- для ТТ на номинальное напряжение 330 кВ и выше;

55- для ТТ на номинальное напряжение 110, 150, 220 кВ;

50- для ТТ на номинальное напряжение до 35 кВ включительно.

Между токами электродинамической и термической стойкости должны быть следующие соотношения:

для ТТ на номинальное напряжение 330 кВ и выше

$$I_{\text{д}} \geq 1.8\sqrt{2}I_{1\text{т}};$$

для ТТ на номинальное напряжение 110, 150 и 220 кВ

$$I_{\text{д}} \geq 1.8\sqrt{2}I_{3\text{т}};$$

для ТТ на номинальное напряжение до 35 кВ включительно $I_{\text{д}} \geq 1.8\sqrt{2}I_{4\text{т}}$.

Температура токоведущих частей ТТ для прохождения тока термической стойкости не должна превышать: 200°С для токоведущих частей из алюминия; 250°С для токоведущих частей из меди и её сплавов; соприкасающихся с органической изоляцией или маслом, и 300°С для токоведущих частей из меди и её сплавов, несоприкасающихся с органической изоляцией или маслом. При определении указанных значений температуры следует исходить из начальных её значений, соответствующих длительной работе трансформатора тока при номинальном токе.

Значения токов электродинамической и термической стойкости государственным стандартом не нормируются. Однако они должны соответствовать электродинамической и термической стойкости других аппаратов высокого напряжения, устанавливаемых в одной цепи с трансформатором тока. В Табл. Приведены практические данные динамической и термической стойкости отечественных трансформаторов тока.

7. Механическая нагрузка определяется давлением ветра со скоростью 40 м/с на поверхность трансформатора тока и тяжением подводящих проводов (в горизонтальном направлении плоскости выводов первичной обмотки), которое должно быть не менее:

505 Н - для ТТ до 35 кВ включительно;

1000 Н - для ТТ на 110-220 кВ;

1500 Н - для ТТ на 330 кВ и выше.

Таковы основные технические параметры и характеристики трансформаторов тока. При проектировании ТТ помимо этих параметров должны

учитываться следующие требования конструкции:

Контактные зажимы выводов первичной обмотки трансформаторов тока должны выполняться с учётом требований ГОСТ 10434-76, а трансформаторов тока наружной установки с учётом, кроме того, требований ГОСТ 21242-75. Контактные зажимы вторичных обмоток должны выполняться с учётом требований ГОСТ 10434-76. Контактные зажимы вторичных обмоток встроенных трансформаторов тока могут быть расположены на конструктивных элементах аппарата, в который встроен трансформатор тока. В трансформаторах тока наружной установки выводные зажимы вторичной обмотки должны находиться в специальных коробках, надёжно защищающих их от попадания атмосферных осадков.

Обозначение выводных концов первичных и вторичных обмоток согласно ГОСТ 7746-78 должно производиться в соответствии с Табл. Линейные выводы первичной обмотки обозначаются символами L_1 и L_2 , которые должны наноситься так, что бы при направлении тока в первичной обмотке от L_1 до H_i соответственно к K_1 и L_2 вторичный ток проходил по внешней цепи (приборам) от I_1 к I_2 .

Маслонаполненный трансформатор тока должен иметь масло расширитель (компенсатор) и указатель уровня масла. Вместимость масло расширителя должна обеспечивать постоянное наличие в нём масла при всех режимах работы трансформатора тока - от отключенного состояния до нормированной токовой нагрузки - и при колебаниях температуры окружающего воздуха, установленных для данного климатического района.

В трансформаторах тока на номинальное напряжение 330 кВ и более обязательно должна быть предусмотрена защита масла от увлажнения, например посредством сильфонов. Целесообразно такую же защиту предусматривать и в трансформаторах тока на меньшее напряжение.

Размеры указателя уровня масла должны быть такими, что бы

обслуживающий персонал мог с безопасного расстояния наблюдать за уровнем масла в трансформаторе тока.

Трансформаторы тока, имеющие массу более 50 кг, должны иметь приспособления для подъёма. Если такие приспособления невозможно выполнить, то завод изготовитель должен указывать в инструкции место захвата трансформаторов тока при подъёме.

Трансформаторы тока, у которых амплитуда напряжения на разомкнутой вторичной обмотке при номинальном токе в первичной обмотке превышает 350 В, должны иметь надпись: «Внимание! Опасно! На разомкнутой обмотке высокое напряжение».

Трансформаторы тока, кроме встроенных, должны иметь контактную площадку для присоединения заземляющего проводника и заземляющий зажим в соответствии с требованиями ГОСТ 21130-75 и ГОСТ 12.2.007.3-75. Возле заземляющего зажима должен быть установлен знак заземления по ГОСТ 21130-75. Указанные требования не распространяются на ТТ с корпусом из литой смолы или пластмассы, не имеющие подлежащих заземлению металлических частей, а так же на ТТ, не подлежащие заземлению согласно ГОСТ 12.2.007.0-75.

1.4 Классы точности нормы погрешностей трансформаторов тока

Таблица 1.2.

Класс точности	первичный ток, % номинального	предельная погрешность			Вторичная нагрузка % номинальной при $\cos\theta=0,8$
		Токовая %	Угловая		
			Мин	град	
0,2	5	+ 0,75	±30	±0,9	25-100
	10	±0,50	±20	±0,6	
	20	±0,35	± 15	±0,45	
	100-200	±0,20	±0,3	±0,3	
0,5	5	± 1,5	±30	±2,7	25-100
	10	±1,0	±60	±1,8	
	20	±0,75	±45	±135	
	100-200	±0,5	±30	±0,09	
1	5	±3,0	±180	±5,4	25-100
	10	±2,0	± 120	±3,6	
	20	±1,5	±90	±2,7	
	100-200	±1,0	±60	±1,8	
3	50-120	±3,0	не нормируется		25-100
5		±5,0			
10		±10			

Классы точности и нормы погрешностей трансформаторов тока установлены ГОСТ 7746-78. В соответствии с этим стандартом трансформаторы тока для измерений разделяются на следующие классы: 0,2; 0,5; 1; 3; 5; 10.

Класс точности характеризует предельные погрешности ТТ при различных значениях тока в первичной обмотке и вторичной нагрузке. Число, обозначающее класс точности, соответствует предельной допустимой токовой погрешности ТТ при номинальном токе и условиях, приведённых в табл. 1.2.

ГЛАВА.2 Требования к трансформаторам предназначенным для КРУ

К основным требованиям, предъявляемым к измерительным трансформаторам тока, встраиваемым в комплексные распределительные устройства, относятся компактность, удобство монтажа и обслуживания, пожаробезопасность, возможность установки в любом положении и т.д.

Кроме того, определенные требования выдвигаются к надежности работы трансформаторов при повышенных температурах, так как воздух в КРУ перегревается на 10-15°C за счет нагрева электрооборудования и ограниченного объема КРУ.

Для обеспечения оптимальной компоновки КРУ к измерительным трансформаторам в ряде случаев предъявляются специальные конструктивные требования.

Всеим этим требованиям наиболее полно удовлетворяют измерительные трансформаторы с литой изоляцией, что определяет их массовое использование в КРУ.

Условия работы измерительных трансформаторов в комплексных распределительных устройствах наружной установки (КРУН) выдвигают дополнительные требования к аппаратуре.

В КРУН создается возможность уменьшить воздействие таких климатических факторов, как солнечная радиация, попадание на аппаратуру снега и дождя, чего нельзя сказать о влиянии влажности, температуры и запыленности. В периоды высокой влажности (осенний и весенний) в утренние и вечерние часы, в результате выпадения росы на запыленной изоляционной поверхности, под действием напряжения создаются благоприятные условия для развития скользящих разрядов. На поверхности органической изоляции, скользящие разряды, вызывают ее деструкцию, что приводит к образованию проводящего следа и к перекрытию изоляционного расстояния по поверхности.

В связи с этим для обеспечения надежной работы измерительных трансформаторов необходимо: либо исключить возможность возникновения скользящих разрядов по поверхности изоляции, либо применять изоляцию, устойчивую к воздействию этих разрядов.

В первом случае при разработке трансформаторов исходили из того, что источником развития скользящего разряда является участок с повышенной напряженностью. Поэтому конфигурация изоляции выбиралась таким образом, чтобы напряженность по поверхности не превышала критической величины и была равномерной, что позволило получить оптимальную изоляционную конструкцию.

Таким путем были созданы трансформаторы тока на 6 и 10 кВ для КРУН. В первичной обмотке трансформаторов напряжения даже при отсутствии нагрузки протекает ток холостого тока, обеспечивающий превышение температуры аппарата над температурой окружающего воздуха на несколько градусов. Этого оказывается достаточно, чтобы значительно ограничить выпадение росы на поверхности изоляции, облегчив тем самым условия работы трансформатора.

При создании конструкции предварительно моделировалась картина электрического поля в различных плоских сечениях трансформатора. Моделирование проводилось в электролитической ванне. Затем на основании полученной модели выбиралась оптимальная конфигурация изоляции. На подготовленных экспериментальных образцах проверялось распределение потенциала по поверхности, после чего окончательно корректировалась конструкция изоляции.

Во втором случае для трансформаторов был применен трекинг стойкий материал - компаунд на основе циклоалифатических смол. При этом учитывалось, что при эксплуатации трансформаторы могут находиться под воздействием напряжения при токе, значительно меньшем номинального или в обесточенном состоянии. А поскольку трансформатор рассчитывается часто даже не на

номинальный ток, а на ток короткого замыкания, то температура трансформатора не будет практически отличаться от температуры окружающего воздуха. Это создает благоприятные условия для выпадения росы на поверхности изоляции аппарата.

ГЛАВА 3. УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В ПЕРЕХОДНОМ И УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

Различают два режима эксплуатации электрической цепи, установившийся и переходной.

Установившимся называют режим работы ТТ, при котором токи в первичной и вторичной обмотках не содержат затухающих свободных апериодических и периодических составляющих.

Переходным режимом работы ТТ называют электромагнитный процесс, возникающий при переходе от одного режима к другому вследствие резкого изменения параметров первичного тока или нагрузки ТТ (например, при к.з. или коммутациях в первичной цепи либо при внезапном замыкании накоротко ветки вторичного тока). При переходном режиме в первичной и вторичной обмотках ТТ проходят свободные затухающие составляющие токов.

При правильном выборе режима эксплуатации ТТ возможные токи в его обмотках ни при установившихся, ни при переходных режимах не должны превышать допустимые по термической и динамической стойкости.

Условия работы ТТ, предназначенного для измерений, существенно отличаются от условий работы ТТ, используемого для защиты. Основным режимом работы ТТ для измерений является нормальный режим. В этом режиме ТТ должен обеспечить пропорциональное воспроизведение первичного тока с наименьшими погрешностями как модуля, так и фазы.

Работа ТТ для защиты начинается лишь с момента возникновения в линии аварийного состояния, характеризующегося прохождением тока нагрузки или тока к.з., в несколько (десятки) раз превышающего рабочий ток линии. К ТТ для защиты предъявляются самые разнообразные требования, обусловленные назначением защиты и схемой её исполнения. Ниже остановимся на нескольких

простых схемах защиты для того, чтобы показать условия работы (эксплуатации) в них.

В схеме максимальной токовой защиты (рис. 1,а) ТТ должен обеспечить в цепи защиты полную мощность, необходимую для срабатывания реле Р при перегрузках или токах короткого замыкания. Это требование сравнительно легкое и его нетрудно выполнить.

В схемах дифференциальной защиты (рис. 1,б) к ТТ предъявляются значительно более высокие требования, а именно:

1. они должны обеспечивать безотказное срабатывание защиты при возникновении повреждения в зоне её действия ; для этого разность вторичных токов спаренных ТТ₁ и ТТ₂ должна превышать ток срабатывания реле Р (рис. 1,б).

2. они не должны вызывать ложных действий защиты при повреждении вне зоны её действия (т.е. при сквозных токах) ; для этого токи небаланса спаренных ТТ₁ и ТТ₂ должны быть меньше тока срабатывания реле Р (рис. 1.б)

Дифференциальная защита выполняется таким образом, что перед защитным участком высоковольтной линии (или генератором, трансформатором) и после него включается по одному ТТ.

Вторичные обмотки этих ТТ соединяются последовательно и согласно (т.е. начало вторичной обмотки ТТ₁ соединено с концом вторичной обмотки ТТ₂). Реле Р присоединено параллельно этим ТТ .

Коэффициенты трансформации ТТ₁ и ТТ₂ подобраны таким образом, что при нормальном режиме работы их вторичные токи были одинаковы. В этом случае при нормальном режиме работы вторичный ток $I_{21} |TТ_1|$ будет совпадать со вторичным током $I_{22} |TТ_2|$, как по абсолютному значению, так и по фазе. Следовательно, через обмотку реле Р не будет проходить уравнивающий ток.

В случае к.з. в зоне защиты при одностороннем питании участка вторичный ток I_{22} будет равен нулю, а при двухстороннем питании участка ток I_{22} будет

складываться с током . Следовательно, через реле Р будет проходить ток, и оно подаст команду на отключение повреждённого участка. При коротком замыкании вне зоны защиты вторичные токи в ТТ₁ и ТТ₂ увеличатся в одинаковой степени и, следовательно, по обмотке реле Р будет проходить лишь небольшой ток небаланса и оно не сработает.

Таким образом, для надёжной работы ТТ в схемах дифференциальной защиты необходимо, чтобы характеристики ТТ были практически одинаковы. Это ограничивает токи небаланса при сквозных токах короткого замыкания.

Для защиты линии или электрооборудования применяется несколько различных защит. В зависимости от защищаемого объекта, числа и параметров применяемых на нём видов защиты может потребоваться два, три и более защитных ТТ, а также ТТ для измерений. Изготавливать такое число отдельных ТТ экономически нецелесообразно. Поэтому высоковольтный трансформатор тока представляет собой изоляционную конструкцию, внутри которой размещены два-три ТТ для релейной защиты и один для измерений. Каждый из этих ТТ имеет отдельный магнитопровод со вторичной обмоткой. Первичная обмотка является общей для всех трансформаторов.

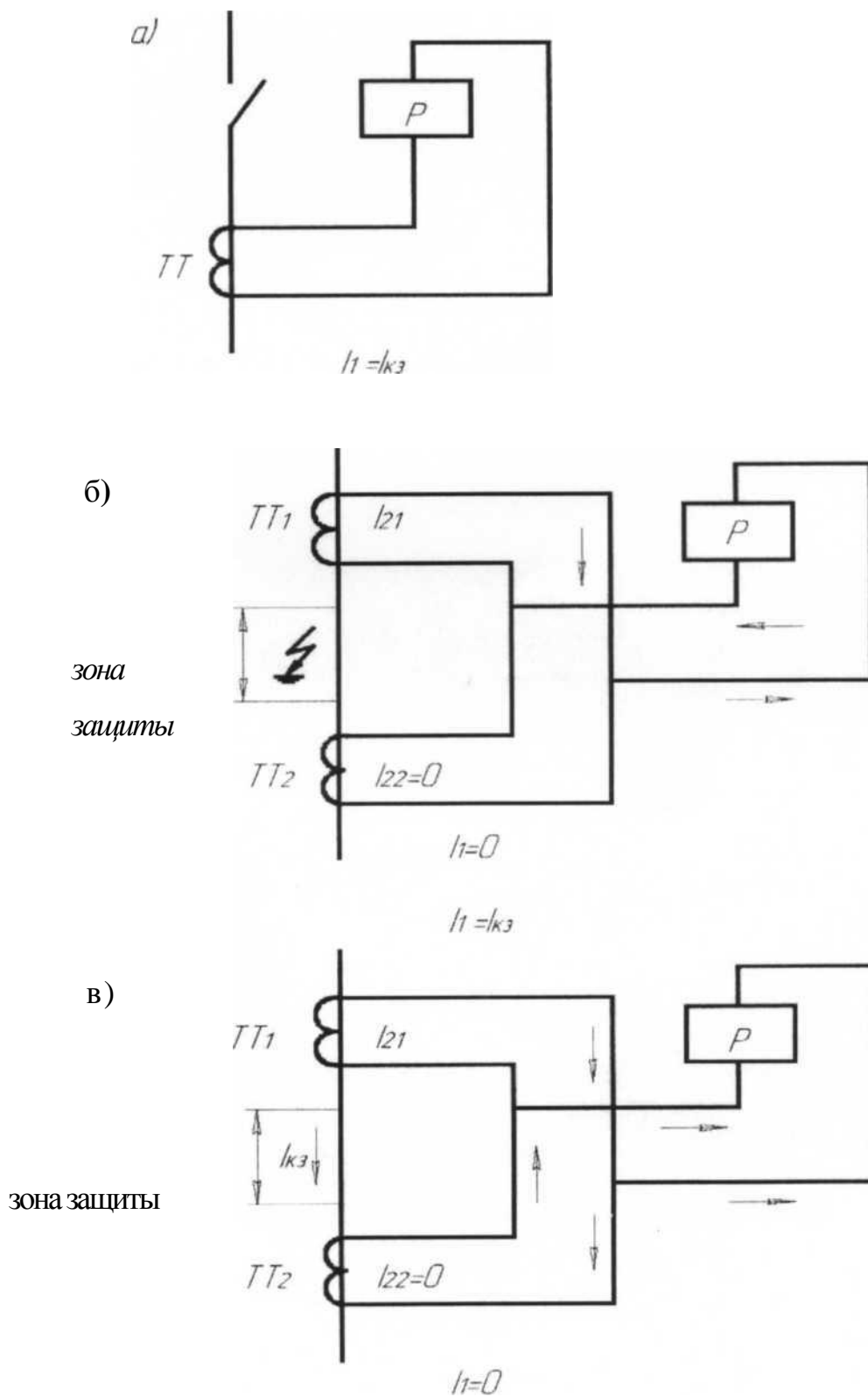


Рис. 3.1. Схемы максимальной токовой защиты (а)
дифференциальной защиты (б и в)

ГЛАВА 4. НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

На основе статистической обработки информации об отказах и дефектах можно определить показатели надежности трансформаторов тока. Объем информации об отказах и дефектах должен обеспечить заданный уровень точности и достоверности оценки надежности и возможность проведения статистического анализа результатов эксплуатации.

Наибольшее число отказов наблюдается в течение первых трех-пяти лет эксплуатации и связано с наличием заводских дефектов и приработочными отказами.

Показатели надежности трансформаторов тока приведены в табл.4.1.

Таблица 4.1.

Номинальное напряжение	35	110-154	220	330	500	750
W , 1/год	0,001...	0,005...	0,020...	0,050...	0,080...	0,100...
	0,005	0,020	0,080	0,120	0,150	0,200

где w - параметр потока отказов, определяемый как количество отказов в единицу времени к количеству испытываемых при условии, что все вышедшие из строя объекты заменяются исправными. В энергетике величину w (t) часто называют удельной поврежденностью.

Примерное распределение отказов трансформаторов тока на 35+750 кВ: перекрытие изоляции при атмосферных и коммутационных перенапряжениях 18%; неудовлетворительная эксплуатация 18%; нарушение контактных соединений 4%; механические повреждения 14%; старение изоляции 18%;

прочие 28%. Типичные отказы, наблюдаемые при их эксплуатации, таковы: разрушение фарфоровых покрышек с последующим загоранием масла; пробой главной изоляции вследствие недостаточного крепления активной части; ослабление болтовых соединений внутри контактов первичной обмотки. Иногда отказы наблюдаются уже через 1-3 месяца после профилактики. Следует отметить сравнительно быстрое возрастание $tg\delta$ масла: через четыре года эксплуатации $tg\delta$ при $> 0^\circ\text{C}$ достигает 10...20%. Электрические воздействия приводят к образованию трещин в изоляции.

Для повышения надежности трансформаторов тока следует использовать масла с повышенными электрическими параметрами, а также обеспечивать более тщательный контроль этих параметров, включая хромографический анализ (не реже одного раза три года). Необходимо оборудовать трансформаторы тока устройством контроля изоляции под рабочим напряжением и повысить качество уплотнений.

По ГОСТ 7746-78 срок службы трансформаторов тока до списания установлен 25 лет.

ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Задано:

- номинальное напряжение $U_{\text{НОМ}}=10$ кВ;
- номинальный первичный ток $I_{1\text{НОМ}} = 600$ А;
- частота $f = 50$ Гц;
- номинальный вторичный ток $I_{2\text{НОМ}} = 5$ А;
- номинальная вторичная нагрузка $Z_{2\text{НОМ}} = 0,4$ Ом;
- класс точности $0,5$;
- ТТ имеет два магнитопровода;
- односекундная термическая стойкость $p_{T1}=65$;
- электродинамическая кратность $k_d = 160$;

$$\cos\varphi_{2\text{н}} = 0,8.$$

При $I_{1\text{НОМ}} = 600$ А необходимая точность может быть получена при использовании одновиткового ТТ. За основу берем ТТ типа ТПОЛ-10.

5.1 Выбор сечения проводников обмоток

Площадь поперечного сечения первичной обмотки выбирается по формуле:

$$q_1 = I_{1\text{НОМ}}/j$$

где плотность тока для меди $j = 1,5 \dots 1,8$ А/мм²;

$$q_1 = 600/1,6 = 375 \text{ мм}^2$$

Диаметр первичной обмотки:

$$d_1 = \sqrt{4q_1/\pi}$$

$$d_1 = \sqrt{4 * 375/3,14} = 21,86 \text{ мм.}$$

По сортаменту выбираем шину круглого сечения диаметром $d_1 = 22$ мм.

Площадь поперечного сечения вторичной обмотки

$$q_1 = I_{1\text{НОМ}}/j$$

$$q_2 = 5/1,6 = 3,125 \text{ мм}^2.$$

Диаметр провода вторичной обмотки

$$d_2 = \sqrt{4q_2/\pi}$$

$$d_2 = \sqrt{4 * 3,125/3,14} = 1,99 \text{ мм.}$$

Выбираем по сортаменту обмоточный провод типа ПЭТВ-939 (высокопрочная эмаль с полиэфирной изоляцией, класс нагревостойкости В)

$$d_2 = 2,00 \text{ мм, } d_{2НЗ} = 2,12 \text{ мм.}$$

5.2 Число витков вторичной обмотки

$$W_2 = W_{2\text{ном}} = I_{1\text{ном}} / W_2 = 600/5 = 120$$

5.3 Ориентировочный выбор сечения магнитопровода

Поскольку сопротивление вторичной обмотки неизвестно, учитывается вначале только сопротивление нагрузки $Z_{2\text{ном}}$.

Индукцию выбираем в пределах 0,06-0,1 Тл.

$$S_c = I_{2\text{ном}} * Z_{2\text{ном}} / 4,44fW_{2\text{ном}} B_m =$$

$$= 5 * 0,4 / 4,44 * 50 * 120 * 0,06 = 9,00125 \text{ м}^2$$

5.4 Определение размеров магнитопровода

Для изготовления магнитопроводов ТТ применяют электротехнические стали 1511, 1512, 1513, 1514. Выбираем сталь марки 1512 толщиной 0,35 мм. Эскиз магнитопровода и обмоток дан на рис.5.4.1.

Внутренний диаметр магнитопровода D_1 определяется толщиной буферной изоляции δ_1 , толщиной основной изоляции δ_3 , толщиной вторичной обмотки δ_2 и диаметром провода первичной обмотки d_1 :

$$D_1 = d_1 + 2\delta_2 + 2\delta_3.$$

В качестве основной изоляции применяем эпоксидный компаунд с допустимой рабочей напряженностью:

$$E_{\text{ср}} = 1,8 * 10^3 \text{В/мм:}$$

$$\delta_3 = U_{\text{ном}}/E_{\text{ср}} = 10/1,8 = 5,6 = 6 \text{ мм}$$

Электрическая прочность эпоксидного компаунда, применяемого для литой изоляции ТТ до 10 кВ, $E_{\text{пр}} = (2...3) * 10^4$ В/мм. Толщина буферной изоляции δ_1 определяется толщинами перфорированной и стеклянной лент. Принимаем $\delta_1 = 2$ мм. Определяем толщину вторичной обмотки. Внутренний диаметр окна ТТ после намотки вторичной обмотки примерно равен:

$$D_1 = d_1 + 2\delta_2 + 2\delta_3 = 22 + 2 * 2 + 2 * 6 = 38 \text{ мм.}$$

Для определения толщины вторичной обмотки b_2 внутренний диаметр магнитопровода определяем по формуле:

$$D_1 = \sqrt{(\delta_{\text{вн}} + 2\delta_{\text{из1}})^2 + \frac{4Q_{\text{кр}}}{\pi}} + 2\delta_{\text{из2}}$$

Для ранее выбранного провода ПЭТВ $d_2 = 2,0$ мм; $d_{\text{нз2}} = 2,12$ мм; $K_y = 0,75$.

$$Q_{\text{кр}} = 3,14 * 120 * 4 * 2,12^2 / 0,75 * 3,14 - 2 = 718,4 \text{ мм}^2$$

Выбираем изоляцию сверху вторичной обмотки. Применяем электрокартон $b_{\text{из2}} = 0,5$ мм. Для изоляции между магнитопроводом и вторичной обмоткой применяем электрокартон $b_{\text{из1}} = 1$ мм.

Тогда можно рассчитать

$$D_1 = \sqrt{(38 + 2 * 1)^2 + \frac{4 * 718,4}{\pi}} + 2 * 0,5 = 51,15 \text{ мм;}$$

принимаем с запасом $D_1 = 55$ мм.

Толщина вторичной обмотки

$$\delta_2 = (D_1 - d_{\text{вн}}) / 2 = (55 - 38) / 2 = 8,5 \text{ мм.}$$

Проверяем электрическую прочность основной изоляции при испытательном напряжении. $U_{\text{ном}} = 10$ кВ. $U_{\text{исп}} = 42$ кВ (ГОСТ 1516.1-78). Максимальная напряженность электрического поля у поверхности первичной обмотки при номинальном напряжении

$$E = 2U_{\text{ном}}/d_1 \ln(D_1 - 2\delta_2)/d_1 = 1,67 \cdot 10^3 \text{ В/мм.}$$

Допустимая напряженность поля при номинальном напряжении
8-10³ В/мм.

Полученная напряженность меньше допустимой.

При испытательном напряжении

$$E_{\text{исп}} = 2 U_{\text{исп}} / d_1 \ln(D_1 - 2\delta_2)/d_1 = 42/11 \ln(55-17)/22 = 7 \text{ кВ/мм,}$$

что меньше допустимой, так как допустимая электрическая прочность компаунда $E_{\text{пр}} = 20 \cdot 10^3 \text{ В/мм.}$

Осевая длина магнитопровода:

$$h = 2S_c/k_{3c}(D_2 - D_1),$$

где D_2 — внешний диаметр магнитопровода, выбирается так, чтобы выполнялось условие:

$$h \geq (D_2 - D_1)/2,$$

где k_{3c} — коэффициент заполнения стали.

Зададимся $D_2 = 115 \text{ мм, } k_{3c} = 0,95$, при этом:

$$h = 2 \cdot 0,00125 / 0,95(0,115 - 0,055) = 0,044 \text{ м} = 44 \text{ мм.}$$

Радиальный размер сечения:

$$(D_2 - D_1)/2 = (115 - 55)/2 = 30 \text{ мм,}$$

$$h = 44 \text{ мм.}$$

Выбираем магнитопровод ОП 55/115-45: $D_1 = 55 \text{ мм, } D_2 = 115 \text{ мм, } h = 45 \text{ мм.}$

Длина средней силовой линии магнитопровода $l_{cp} = \pi(D_2 + D_1)/2 = 267 \text{ мм.}$

5.5 Активное сопротивление вторичной обмотки

$$r_2 = \rho l_{cp} w_2 / q_2,$$

где $\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta_{2m})$; ρ_0 - удельное сопротивление меди при 0°C,

$$p = 1,58 \cdot 10^{-6} (1 + 0,004 \cdot 130) = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом-см};$$

θ_{2m} - допустимая температура нагрева изоляции класса В,

$\theta_{2m} = 130^\circ\text{C}$, $a = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$ - температурный коэффициент сопротивления,

l_{cp} - средняя длина витка, $l_{cp} = 2h + D_0 - d_0$, где $D_0 = D_2 - 2b_2''$, b_2'' - внешняя толщина вторичной обмотки,

$$b_2'' = \delta_{из1} + d_{2из} + \delta_{из2} = 0,5 + 2,12 + 1 = 3,62 \text{ мм},$$

$$D_0 = 115 + 2 \cdot 3,62 = 122,24 \text{ мм},$$

$$d_0 = D_0 - 2\delta_2,$$

где δ_2 - толщина вторичной обмотки внутри окна ТТ,

$$2\delta_2 = 17 \text{ мм}, d_0 = 115 - 17 = 98 \text{ мм},$$

$$l_{cp} = 2 \cdot 45 + 122,24 - 98 = 171,24 \text{ мм}.$$

$$r_2 = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 171,24 - 120 / 3,14 \cdot 10^2 = 1598 \cdot 10^{-6} = 0,16 \text{ Ом}.$$

Для уменьшения индуктивного сопротивления вторичной обмотки x_2 в схеме замещения витки равномерно распределяются по магнитопроводу. При соблюдении этого условия $x_2 = 0$.

5.6. Полное сопротивление вторичной цепи

$$Z_{0,2} = \sqrt{(R_2 + r_2)^2 + X_2^2}$$

где $R_2 = Z_{2ном} \cos \varphi_{ном} = 0,4 \cdot 0,8 = 0,32 \text{ Ом}$ - активное сопротивление нагрузки, $X_2 = Z_{2ном} \sin \varphi_{ном} = 0,4 \cdot 0,6 = 0,24 \text{ Ом}$ - реактивное сопротивление нагрузки, $r_2 = 0,16 \text{ Ом}$ - активное сопротивление вторичной обмотки,

$$Z_{0,2} = \sqrt{(0,32 + 0,16)^2 + 0,24^2} = 0,54 \text{ Ом}.$$

5.7. Угол сдвига фаз между E_2 и I_2

$$a = \operatorname{arctg} (X_2/R_2 + r_2) = \operatorname{arctg} 0,5 = 26,56^\circ.$$

5.8 Расчет погрешности проводим для $I_1 = 0,1I_{1\text{ном}}$, $I_1 = 0,2I_{1\text{ном}}$, $I_1 = 1,2I_{1\text{ном}}$ при $Z_2 = Z_{2\text{ном}}$

Токовая погрешность определяется формулой

$$\Delta I_{\%} = I_0 w_1 / I_1 w_1 \sin(\alpha + \psi) * 100,$$

где $I_0 w_1 = H_0 l_{\text{ср}}$ — полная МДС, $H_0 = f(B_m)$ — удельная МДС намагничивания.

Магнитная индукция

$$B_m = E_2 / 4,44 f S_c w_{2\text{ном}},$$

где $E_2 = I_2 Z_{0,2}$ - ЭДС вторичной обмотки.

Угловая погрешность

$$\delta = 3440 (I_0 w_1 / I_1 w_1) \cos(\alpha + \psi).$$

Таблица 5.1.

Параметр	Расчетные значения при первичном токе, А			
	$0,1I_{НОМ} = 60$	$0,2I_{НОМ} = 120$	$1I_{НОМ} = 600$	$1,2I_{НОМ} = 720$
$I_2, А$	0,5	1	5	6
$E_2, В$	0,27	0,54	2,7	3,24
$B_m, ТЛ$	0,008	0,016	0,08	0,097
$H_0 = f(B_m),$ А/м	3,0	4,12	11,6	11,2
$I_0 w_1 = H_0 l_{cp}, А$	0,8	1,1	3,09	3,36
ψ	14,4°	15°	22,5°	23,7°
$\sin(\alpha + \psi)$	0,65	0,66	0,76	0,77
$\cos(\alpha + \psi)$	0,76	0,75	0,66	0,64
$\Delta I_{\%}$	-0,866%	-0,6%	-0,39%	-0,36%
А	34,85	23,65	11,69	10,27

Угол потерь в стали ψ определяем по значению удельной МДС. Результаты расчетов приведены в таблице 5.8.1., из которой видно, что погрешность ТТ при $Z_2 = Z_{2НОМ}$ укладывается в класс точности 0,5. Значит не требуется проводить витковую коррекцию.

Аналогичный расчет проведем для значения нагрузки

$$Z_2 = 0,25 * Z_{2\text{НОМ}},$$

$$R_2 = 0,25 * Z_{2\text{НОМ}} \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,08 \text{ Ом},$$

$$X_2 = 0,25 * Z_{2\text{НОМ}} \sin \varphi_{\text{НОМ}} = 0,06 \text{ Ом},$$

$$Z_{0,2} = \sqrt{(0,08 + 0,16) + 0,06} = 0,25$$

5.9 Расчёт предельной кратности в классе точности 10P.

а) Расчёт характеристики холостого хода

$$E_2 = f(I_{01}),$$

$$\text{где } I_{01} = H_0 l_{\text{ср}} / w_1$$

Задаёмся значениями $B_m = 0,5 \div 1,75$ Тл и определяем по кривой намагничивания значения H_0 и $E_2 = 4,44 f w_{2\text{НОМ}} B_m S_c$.

Результаты расчёта приведены в табл.5.9.1. По табл. Строим характеристику $E_2 = f(I_{01})$.

Таблица 5.2.

B_m , Тл	H_0 , А/м	$I_{01} = H_0 l_{\text{ср}} / w_1$	E_2	I_{01}
0,5	25,2	0,056	16,65	6,7
0,7	34,2	0,069	23,31	8,27
1	53	0,118	33,3	14,3
1,2	65	0,145	39,96	17,4
1,3	100	0,222	43,29	26,6
1,4	194	0,332	46,62	39,8

Продолжение Таблицы 5.2.

1,5	230	0,512	49,95	61,4
1,6	400	0,89	53,28	107
1,7	1000	2,225	56,61	267
1,75	1250	2,78	58,57	334

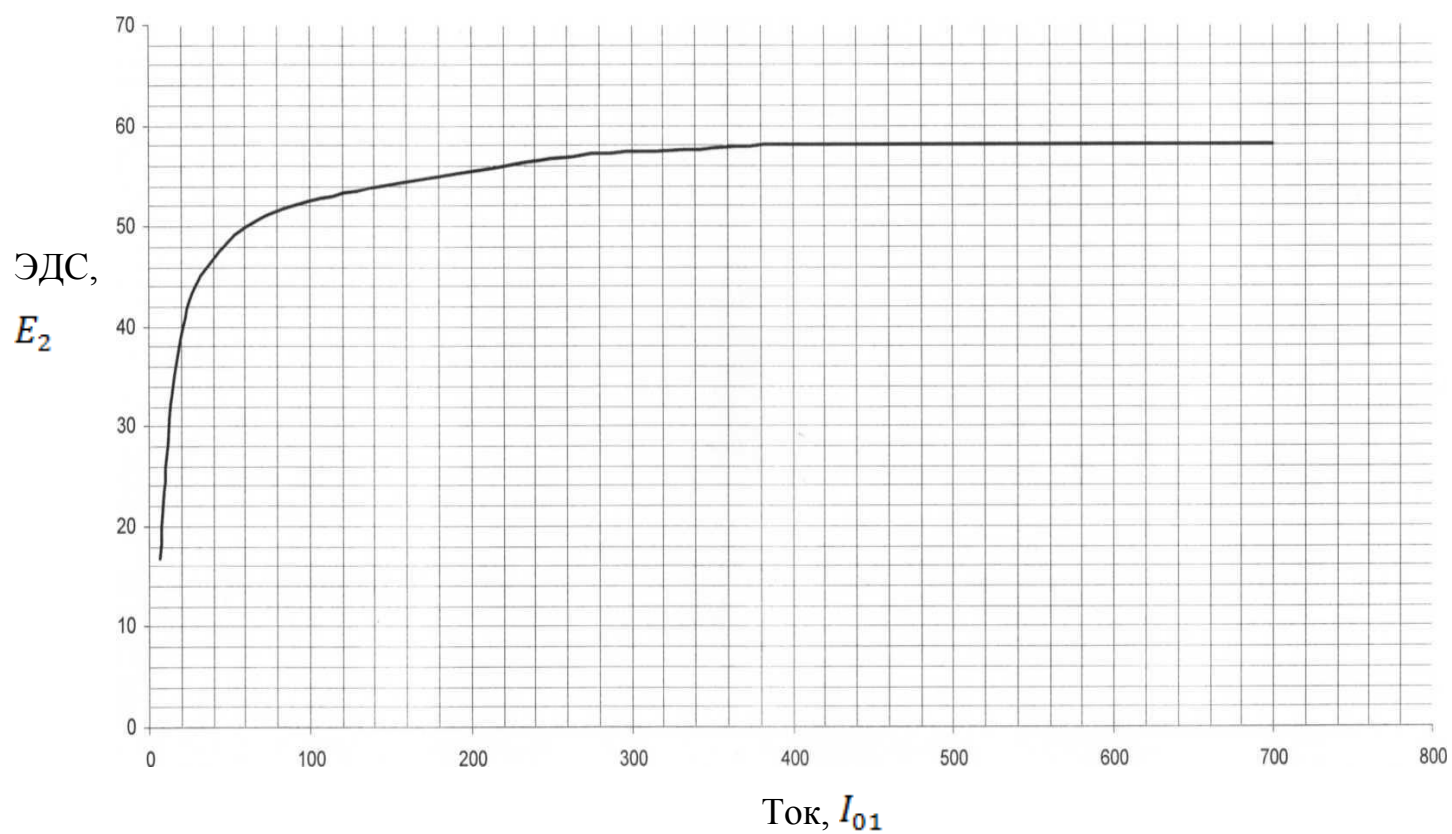


Рис. 5.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

5.9 Нагрев в длительном режиме

Поскольку допускаются 10%-ые перегрузки по току I_1 расчет производится для $I = 1,1 \cdot I_{\text{ном}}$. Ввиду сложности картины теплового поля, вводим следующие упрощения:

1. теплота P_2 , выделяемая вторичной обмоткой, проходит через эпоксидный слой изоляции и передается в окружающую среду примерно через половину охлаждающей поверхности изоляции;

2. теплота P_1 выделяемая первичной обмоткой, передается только через шину, присоединенную к концу, первичной обмотки.

а) Рассмотрим нагрев вторичной обмотки:

$$\theta_2 = \theta_0 + \tau_{\text{пов}} + \Delta\tau_{\text{из}}$$

где θ_0 - температура окружающей среды, $\theta_0 = 40^\circ\text{C}$;

$\tau_{\text{пов}}$ - превышение температуры поверхности изолятора;

$\Delta\tau_{\text{из}}$ - перепад температуры на толщине изоляции.

$$\Delta\tau_{\text{из}} = \frac{I_2^2 r_{02} R_{\square 1} R_{\square 2} (1 + \alpha \theta_2)}{D} = I_2^2 r_{02} (1 + \alpha \theta_2) R_t$$

где r_0 - сопротивление обмотки при 0°C ;

термические сопротивления изоляции:

R_t - результирующее, $R_{\square 1}$ - цилиндра, $R_{\square 2}$ - торца изоляции.

Для определения $\tau_{\text{пов}}$ необходимо рассчитать поверхность охлаждения. Так как ТТ обычно имеет два магнитопровода с обмоткой, то поверхность охлаждения на один магнитопровод равна:

$$S_{\text{охл}} = (S_1 + 2S_2)/2,$$

где S_1 - поверхность цилиндра, $S_1 = \pi D_{06} h_{06} = 3,14 \cdot 16 \cdot 22 = 1105 \text{ см}^2$;

S_2 - площадь торцевой поверхности оболочки, $S_2 = \pi D_{об}^2/4 - \pi d_1^2/4 = 197 \text{ см}^2$;

$D_{об}$ - диаметр эпоксидной оболочки, $D_{об} = 16 \text{ см}$; $h_{об}$ - длина оболочки,

$h_{об} = 22 \text{ см}$;

$S_{охл} = (1105 + 2 \cdot 197)/2 = 749,5 \text{ см}^2$

Коэффициент теплоотдачи $K_T = 7 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$R_{t1} = \left(\frac{1}{2\pi\lambda l} \right) * \ln D_{об}/D_1 = 3,18 \text{ } ^\circ\text{CВт}$$

$$L_{из} = 0,15 \cdot 10^2 \text{ Вт/см } ^\circ\text{C}$$

где $L_{из}$ - удельная теплопроводность изоляции,

$$l = h_{об} / 2 = 11 \text{ см.}$$

$$R_{t2} = 4l_2 / (D_2^2 - D_1^2) = 15,4$$

где $l_2 = 2,5 \text{ см}$ - длина от торца магнитопровода до корпуса.

$$\theta_2 = \theta_0 \frac{I_2^2 r_{02} (1 + \alpha \theta_2)}{l \cdot c} + \frac{I_2^2 r_{02} R_{t1} R_{t2} (1 + \alpha \theta_2)}{D \quad l \quad D}$$

решая это уравнение относительно θ_2 получим:

$$\theta_2 = \theta_0 \frac{\theta_0 k_m S_{охл} (R_{t1} + R_{t2}) + I_2^2 r_{02} (R_{t1} + R_{t2}) + I_2^2 r_{02} k_m S_{охл} R_{t1} R_{t2}}{l \cdot c \quad (D \quad l \quad D) \quad I_2^2 r_{02} \quad (D \quad l \quad D) \quad I_2^2 r_{02} l \cdot c \quad \sim}$$

После подстановки $\theta_2 = 64,35^\circ\text{C}$ полученная температура меньше допустимой для класса В.

Проводим уточненный расчет сопротивления вторичной обмотки

$$r_2 = 1,58 \cdot 10^{-6} (1 + 0,004 \cdot 64,35) 17,12 \cdot 120 / 3,14 \cdot 10^{-2} = 0,13 \text{ Ом}$$

Так как сопротивление обмотки уменьшилось, то уменьшится погрешность ТТ.

б) Рассмотрим нагрев первичной обмотки

$$\theta_1 = \theta_0 + \tau_m + \Delta\tau_1$$

где τ_T - превышение температуры на торце шины, $\tau_T = \tau_{ш} + I_1^2 R_1 / 2\rho A q_{ш}$,

$\tau_{ш}$ - превышение температуры шины, $\tau_{ш} = I_1^2 \rho / q_{ш} k_T S_0$,

$q_{ш}$ - сечение шины, $q_{ш} = 3,6$ см ;

k_T - коэффициент теплоотдачи шины, $k_T = 10$ Вт/м $^{\circ}$ С

S_0 - боковая поверхность единицы длины шины, $S_0 = 13,2$ см пог

(берется шина $60*6$ мм²);

ρ - удельное сопротивление при $\theta = 100^{\circ}$ С, $\rho = 0,022 \cdot 10^{-4}$ Ом*см;

R_1 - сопротивление первичной обмотки при $\theta = 100^{\circ}$ С, $I_1 = 660$ А.

Для определения $\Delta\tau_1$ необходимо найти R_{TM} - термическое сопротивление половины длины первичной обмотки, $R_{TM} = l_1 / 2\lambda q_1 = 40/2 * 4 * 3,6 = 1,4$

где l_1 - длина первичной обмотки, $l_1 = 40$ см;

λ - удельная теплопроводность меди, $\lambda = 4$ Вт/см $^{\circ}$ С;

R_1 - сопротивление первичной обмотки, $R_1 = \rho l_1 / q_1 = 2,4 * 10^{-6} * 40 / 3,6 = 26,7 \cdot 10^{-6}$ Ом;

Перепад температуры в стержне первичной обмотки на длине $l_1 / 2$:

$\Delta\tau = 0.5 I_1^2 R_1 R_{TM} = 8,8^{\circ}$ С 0,032;

$$\rho = \sqrt{k_T S_0 / \lambda q_{ш}}$$

$I_1^2 R_1 0.5 \rho \lambda q_{ш} = 13,3^{\circ}$ С;

$\theta_1 = 81,67$ $^{\circ}$ С

В действительности температура ниже,
так как сопротивление $R_1 < 26,7 \cdot 10^{-6}$ Ом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследуемый ТТ типа ТПОЛ 10 соответствует предъявленным к таким аппаратам требованиям, а так же работает в заданном классе точности: 0,5 – обмотки для измерения; 10Р – обмотки для защиты трансформатора применяется для питания цепей измерения силы тока, мощности и энергии, для питания цепей защиты и автоматики, для изолирования цепей вторичной коммутации от высокого напряжения в электроустановках переменного тока напряжения 10 кВ.

Для данного трансформатора были проведены расчеты:

а) расчет показывающий, что нагрев в длительном режиме ТТ соответствует допустимому класс В;

б) расчет термической стойкости трансформатора, при котором были определены $\theta_{\text{доп}} = 250^{\circ}\text{C}$

в) проведена проверка на электродинамическую стойкость, которая показала что напряжение в заделке: $\delta = 330\text{Н/см}^2$

при допустимом $\delta_{\text{доп}} = 6000\text{Н/см}$

Модернизация данного трансформатора может быть осуществлена применением специальной электротехнической стали имеющей более лучшую магнитную проницаемость проходящую через магнитопровод, что позволит уменьшить погрешность и габариты ТТ.

При появлении токов КЗ может произойти повреждение литой, смоляной изоляции, поэтому в качестве модернизации предлагается применить термостойкую резиновую прокладку, которая демпфирует возможное расширение первичной обмотки.

В качестве материала вторичной обмотки предлагается медь, т.к. применение алюминия приведет к увеличению обмотки и магнитопровода.

Список используемой литературы.

1. Проектирование электрических аппаратов. Учебник для вузов. Под ред. Г.Н. Александрова. 1985г.
2. Л.П. Куженин. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. 1980г.
3. Л.Б. Болотин, Л.З. Эйдель. Измерение в режимах короткого замыкания. 1989г.
4. В.Е. Казанский. Трансформаторы в схемах релейной защиты. 1969г.
5. Л.З. Пирятинский. Надежность высоковольтных электрических аппаратов. 1984г.
6. В.Е. Кузнецов. Электрические и электронные аппараты. Высоковольтные измерительные трансформаторы. 2013г.
7. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. 1987г.
8. ГОСТ7746-78. Трансформаторы Общие технические условия. 1979г.
9. Электротехнический справочник. 1986г.
10. Аппараты высокого напряжения. 1985г.
11. Измерения при испытании аппаратов в режиме короткого замыкания. 1988г.

